



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONAS SALMI
KAUPALLISET PYÖRIMISNOPEUSSÄÄDETYT PUMPPUOH-
JATUT SYLINTERIKÄYTÖT

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Mikko Huova
7. joulukuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JOONAS SALMI: Kaupalliset pyörimisnopeussäädetyt pumppuohjatut sylinterikäytöt (Commercial variable speed pump controlled cylinder drives)

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 19 sivua

Joulukuu 2017

Automaatiotekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Hydraulikka ja automatiikka

Tarkastaja: Mikko Huova

Avainsanat: pumppuohjaus, energiatehokkuus, pyörimisnopeussäätö, sylinterikäyttö

Energiasäädösten kiristyessä monilla aloilla on pyritty kehittämään jatkuvasti energiatehokkaampia tuotteita, komponentteja ja laitteita. Hydraulikkankin puolella perinteisille venttiiliohjauksille on pyritty etsimään korvaajaa sen heikon energiatehokkuuden vuoksi. Yksi vastaus ongelmaan on ollut pyörimisnopeussäädetyt pumppuohjausjärjestelmät, joissa pumppu tuottaa tilavuusvirtaa järjestelmään vain sen verran, mitä toimilaitteen kuorma vaatii. Kuitenkaan kyseiset järjestelmät eivät ole vielä kovinkaan yleisiä.

Työn tarkoituksena oli tutkia tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevia pyörimisnopeussäädettyjä pumppuohjausjärjestelmiä ja vertailla niitä keskenään. Työhön valikoitui Bosch Rexrothin, Eatonin ja Parker Hannifinin valmistamat pumppuohjauskokonaisuudet, joille kaikille ominaista oli korkea energiatehokkuus, hiljainen käyntiääni, kompakti koko ja pienempi lämmöntuotto, jolloin jäähdytykseen käytettäviä kustannuksia voidaan pienentää. Lisäksi pumppuohjausjärjestelmiä hyödyntävissä sovelluksissa öljytilavuudet ovat pienempiä, minkä vuoksi ne ovat myös saasteettomampia. Huolimatta järjestelmien monista eduista, niiden suosio ei ole ollut kovinkaan suuri johtuen esimerkiksi järjestelmän suunnitteluun tarvittavan ammattitaidon puutteesta, ja siitä, että järjestelmän toiminta yleensäkin on vielä ihmisille melko vieras.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	HYDRAULISYLINTERIEN SÄÄTÖTAVAT	2
2.1	Venttiiliohjaus	2
2.2	Pumppuohjaus	5
2.3	Hybridiohjaus	8
3.	KAUPALLISET TUOTTEET	10
3.1	Sytronix	10
3.2	Eaton VSD.....	13
3.3	Parker Variable Controlled Pump	14
4.	PUMPPUOHJAUSJÄRJESTELMIEN ONGELMIA	15
5.	YHTEENVETO	16
	LÄHTEET	17

1. JOHDANTO

Jatkuvasti kiristyvät energiasäädökset ovat vauhdittaneet monilla aloilla uusien energiatehokkaiden laitteiden ja komponenttien kehittämistä. Energiatehokkuudesta on myös samalla syntynyt trendi, joka yhä useammin ohjaa asiakkaita valitsemaan ostoksensa valmistajilta sen mukaan, mikä vähiten tuottaa hukkaenergiaa. Tästä syystä hydraulikankin alueella on ryhdytty tutkimaan energiatehokkaampia vaihtoehtoja perinteisemmille venttiiliohjausjärjestelmille. Yksi tutkimuksien tulos on ollut pyörimisnopeussäädetyt pumppuohjausjärjestelmät. Eri syiden johdosta kyseiset järjestelmät eivät ole kuitenkaan vielä kovinkaan yleisiä.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevia sylinterikäyttöihin soveltuvia pyörimisnopeussäädettyjä pumppuohjausjärjestelmiä. Työssä käydään läpi kaupallisten järjestelmien ominaisuuksia ja verrataan niitä mahdollisuuksien mukaan sekä keskenään että perinteisiin venttiiliohjattuihin järjestelmiin.

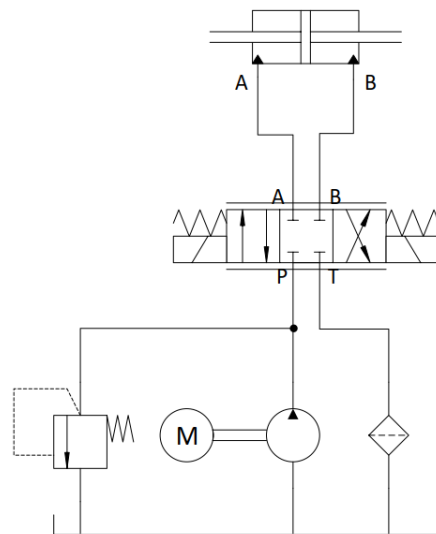
Kandidaatintyön toinen luku käsittelee erilaisten hydraulisten ohjausjärjestelmien teoriaa yleisesti. Kolmannessa luvussa esitellään kolme eri kaupallista pyörimisnopeussäädettyä pumppuohjausjärjestelmää ja käsitellään niiden ominaisuuksia. Neljäs luku tuo esille syitä, miksi pumppuohjausjärjestelmät eivät vielä ole kovinkaan yleisiä. Viimeisessä luvussa on kandidaatintyön yhteenveto.

2. HYDRAULISYLINTERIEN SÄÄTÖTAVAT

Hydraulisylinterin nopeutta voidaan säätää karkeasti jaoteltuna joko venttiiliohjauksen tai pumppuohjauksen avulla [1]. Näistä kahdesta huomattavasti yleisempi säätötapa on nykypäivänä venttiiliohjaus. Koska molemmilla järjestelmillä on omat hyvät ja huonot puolensa, niistä on kehitetty myös hybridijärjestelmiä, joissa tulee esille molempien järjestelmien vahvuudet [2, s. 7].

2.1 Venttiiliohjaus

Venttiiliohjauksessa hydraulikkajärjestelmän nestevirtausta ohjataan ja kuristetaan erilaisten hydraulisten venttiilien avulla pumpun ja toimilaitteen välillä, jotta toimilaite toimisi halutulla tavalla. Venttiilit voivat olla esimerkiksi suunta-, proportionaali-, servo- tai digitaaliventtiilejä. Paineenrajoitusventtiilin avulla myös ohjataan ylimääräinen neste järjestelmästä takaisin tankkiin. Kuvassa 1 on esitetty erään yksinkertaisen venttiiliohjatun järjestelmän hydraulikkakaavio, jossa toimilaitteena on symmetrinen sylinteri ja virtausta ohjataan proportionaaliventtiilin avulla.



Kuva 1. Venttiiliohjattu järjestelmä.

Kuvan 1 järjestelmässä vakio kierrosnopeudella pyörivä moottori pyörittää vakiotilavuuksista pumppua, joka tuottaa tilavuusvirtaa järjestelmään kaavan (1) mukaan

$$Q_{tod} = nV_k\eta_{vol}, \quad (1)$$

jossa n on pumppua pyörittävän moottorin pyörimisnopeus [1/s], V_k on pumpun tuottama kierrostilavuus [m^3] ja η_{vol} on pumpun volumetrinen hyötysuhde [-][2, s. 3].

Pumpun tuottaman tilavuusvirran avulla voidaan laskea pumpun vaatima käyttöteho kaavan (2) avulla

$$P_{käyttö} = T\omega = \frac{Q_{tod}\Delta p}{\eta_{kok,p}}, \quad (2)$$

jossa T on pumpun käyttömomentti [Nm], ω on pumpun akselin kulmanopeus [rad/s], Δp on paine-ero pumpun yli [Pa] ja $\eta_{kok,p}$ on pumpun kokonaishyötysuhde [-][2, s. 3].

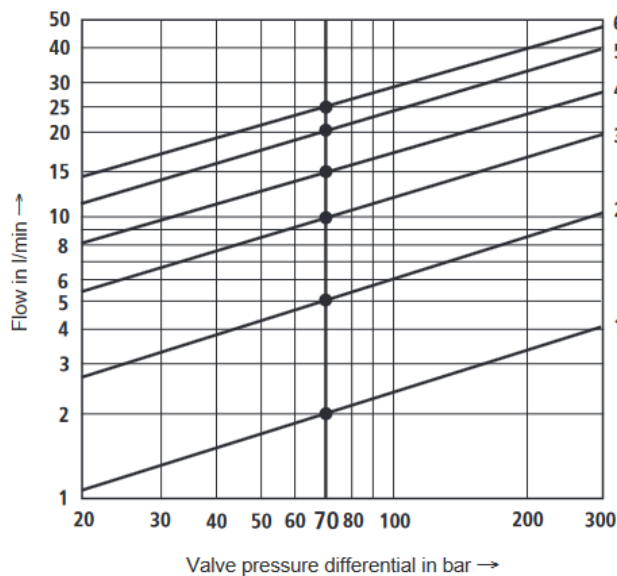
Oletetaan kuvan 1 järjestelmän paineen olevan vakio. Tällöin pumppu tuottaa koko käynnissäoloajan järjestelmälle hydraulista tehoa kaavan (3) mukaan

$$P_{hyd} = Q_{tod}p, \quad (3)$$

jossa p on järjestelmän paine [Pa]. Järjestelmässä vallitseva paine on rajoitettu paineenrajoitusventtiilin avulla. [2, s. 3]

Vaikka pumppu tuottaa vakiotehoa koko ajan järjestelmään, sylinterin vaatima teho saat-
taa vaihdella paljonkin käytön aikana. Tällöin ylimääräinen tuotettu hydraulinen teho jou-
dutaan ohjaamaan paineenrajoitusventtiilin kautta takaisin tankkiin, jolloin syntyy huk-
kaenergiaa. [2, s. 3] Myös järjestelmän servoventtiilissä tapahtuu painehäviötä, joka pie-
nentää toimilaitteelle siirrettyä hydraulista tehoa. Venttiilien valmistajat ilmoittavat data-
lehdissään yksittäisen venttiilin painehäviön tietyllä tilavuusvirralla kuvaajan avulla [3,
s. 42]. Kuvassa 2 on esimerkkinä Bosch Rexrothin valmistaman 4/3-servosuuntaventtiilin
ominaiskäyrät. Kuvaajassa y-akselilla on venttiilin läpi menevän tilavuusvirran suuruus
ja x-akselilla on venttiilissä tapahtuva painehäviö. Käyrät on muodostettu siten, että vent-
tiilin ohjaussignaali on ollut suurin mahdollinen, eli venttiili on ääriasennossaan. Tutkit-
tava käyrä riippuu asiakkaan tilaaman venttiilin koosta.

Flow/load function (tolerance $\pm 10\%$) at 100 % command value signal



Ordering code	Nominal flow	Curve
2	2 l/min	1
5	5 l/min	2
10	10 l/min	3
15	15 l/min	4
20	20 l/min	5
25	25 l/min	6

$\Delta p =$ Valve pressure differential
(inlet pressure p_p
minus load pressure p_L
minus return flow pressure p_T)

Kuva 2. Bosch Rexrothin 4/3-servosuntaventtiilin ominaiskäyrät [4, s. 7].

Kuvan 2 kuvaajista nähdään, että paine-ero on sitä suurempi, mitä enemmän tilavuusvirtaa venttiilin läpi ohjataan. Kun tiedetään järjestelmässä liikkuvan tilavuusvirran suuruus ja venttiilin paine-ero kyseisellä tilavuusvirralla, voidaan kaavan (4) avulla laskea venttiilissä tapahtuva tehohäviö

$$P_{\text{häviö}} = Q_j \Delta p_v, \quad (4)$$

jossa Q_j on venttiilin läpi menevä tilavuusvirta [m^3/s] ja Δp_v on venttiilissä tapahtuva painehäviö [Pa]. Hydraulikkajärjestelmän monimutkaistuessa järjestelmään tarvitaan usein lisää erilaisia venttiilejä ohjaamaan ja kuristamaan virtausta, jolloin jokaisesta yksittäisestä venttiilistä syntyy lisää hukкатаhoa. Tämä hukкатаho havaitaan järjestelmään syntyvänä lämpönä, jolloin vaarana voi olla hydraulinesteen ylikuumeneminen ja nesteen ominaisuuksien heikentyminen. Näiden seurauksien eliminoimiseksi järjestelmään täytyy sisällyttää oma jäähdytyksensä, joka lisää kustannuksia ja samalla myös järjestelmän tehohäviöitä. [1]

Vaikka venttiiliohjatuissa järjestelmissä syntyy paljon tehohäviöitä, ne ovat säilyttäneet suuren suosionsa halvan hintansa ja yksinkertaisen rakenteensa vuoksi. Lisäksi (servo)venttiiliohjauksen etuja ovat tarkkuus, nopea dynamiikka sekä erinomainen tehoteho.

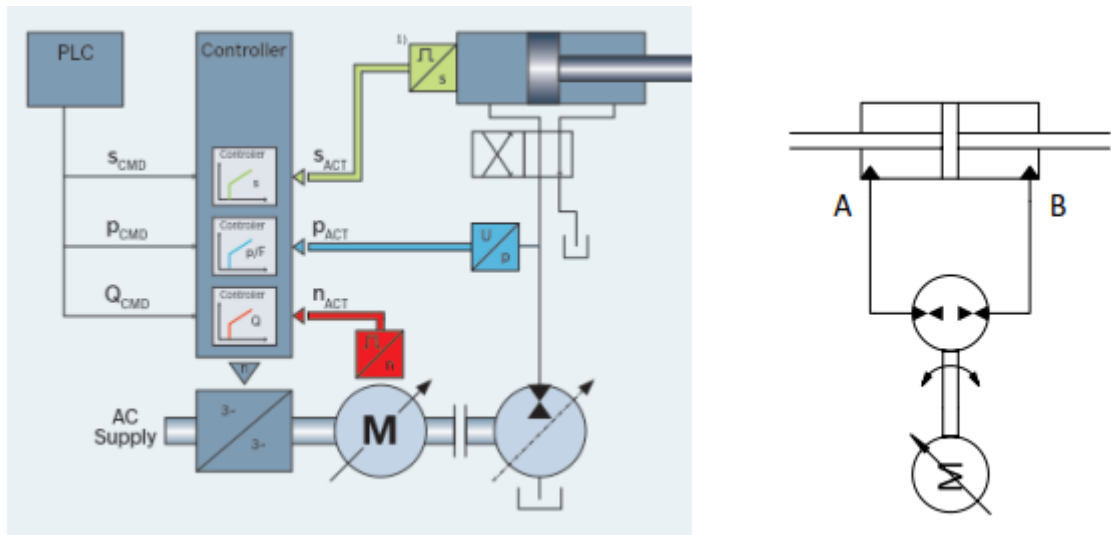
Huonoa energiatehokkuutta on yritetty parantaa kehittämällä venttiiliohjattuihin järjestelmiin kuormantuntevia järjestelmiä (Load Sensing, LS-järjestelmä) [1]. LS-järjestelmissä mitataan toimilaitteella olevaa kuormanpainetta ja pumpun tuotto ja paine säädetään käytön aikana vastaamaan tätä tietoa. Jos toimilaitteita on kuitenkin useita, järjestelmän paine

säädetään suurimman kuormanpaineen mukaisesti. Tämän vuoksi pienemmän kuormanpaineen omaava toimilaite saa saman syöttöpaineen kuin suuremman kuormanpaineen omaava toimilaite, jolloin syntyy tarpeetonta hukkatahoa. [5] Tämä on yksi syy sille, miksi LS-järjestelmilläkään ei kyetä eliminoimaan hukkatahoja tarpeeksi merkittävästi.

2.2 Pumppuohjaus

Pumppuohjauksessa sylinterin nopeuden muutos tapahtuu säätämällä järjestelmän pumpun tuottamaa tilavuusvirtaa toimilaitteelle. Tämä voidaan toteuttaa joko suoraan pumpun kierrostilavuutta muuttamalla tai säätämällä pumpun pyörimisnopeutta säädettävän sähkömoottorin avulla. Myös näiden yhdistelmä on mahdollista toteuttaa [6]. Sääto toteutetaan järjestelmissä erillisellä ohjaimella ja sen sisältämällä säätösovelluksella. Se, miten säädin muokkaa pumpun tuottoa, sähkömoottorin pyörimisnopeutta tai molempia, riippuu siitä, mitä muuttujia järjestelmässä pyritään muuttamaan käytön aikana. Pumppuohjaukset voivat olla esimerkiksi paineohjattuja (pumppu tuottaa halutun paineen), tilavuusvirtaohjattuja (pumppu tuottaa halutun tilavuusvirran), teho-ohjattuja (järjestelmää käytetään tietyllä tavoitetehtolla) tai nopeusohjattuja (pumpun tuotto säädetään siten, että sylinteri liikkuu halutulla nopeudella). Ohjausjärjestelmät voivat olla myös avoimia tai suljettuja. Avoimissa ohjausjärjestelmissä ei ole takaisinkytkentöjä järjestelmästä, jolloin säädin toimii vain sille ohjelmoidun työkiertoprofiilin mukaisesti. Suljetussa ohjausjärjestelmässä taas säädin ottaa takaisinkytkentänä jatkuvasti tietoa halutusta muuttujasta ja säätää pumppuohjausta ohjelmoidun työkiertoprofiilin lisäksi takaisinkytkentätiedon perusteella. Yleisesti pumppuohjauksen tarkoitus on ohjata pumpun tuottoa halutun toimilaitteen nopeuden mukaan, jolloin järjestelmään ei siirry ylimääräistä tilavuusvirtaa. Pumppuohjausjärjestelmiä voidaan esimerkiksi soveltaa monenlaisiin teollisuudessa käytettäviin laitteisiin, kuten metallintyöstölaitteisiin ja puristimiin. [6–9]

Pumppuohjatut hydraulikkajärjestelmät jakautuvat avoimiin ja suljettuihin järjestelmiin. Kuvassa 3 on esimerkit sekä avoimen että suljetun järjestelmän hydraulikkakaavioista. Avoimessa systeemissä vaaditaan venttiilejä ohjaamaan virtaus toimilaitteelle, minkä vuoksi sen energiatehokkuus heikkenee hieman venttiileissä tapahtuvan tehohäviön vuoksi. Joissakin avoimien järjestelmien tapauksissa myös säätöventtiilit ovat tarpeellisia. [1]



Kuva 3. Avoimen (vasen) [9, s. 36] ja suljetun (oikea) pumppuohjatun järjestelmän toimintaperiaatteiden mukaiset hydraulikkakaaviot.

Kuvan 3 avoin järjestelmä sisältää ohjaimen lisäksi säädettävän sähkömoottorin ja pumpun, yhden suuntaventtiilin ja epäsymmetrisen sylinterin. Se, miten säädin muokkaa järjestelmään tuotettua tehoa, liittyy kaavan (5) mukaiseen tehon määritelmään

$$P_{tuotto} = p_{vaadittu}Q, \quad (5)$$

jossa Q on järjestelmän tilavuusvirta [m^3/s] ja $p_{vaadittu}$ on paine, joka pumpun tarvitsee tuottaa [Pa]. Oletetaan, että järjestelmän sylinteriä liikutetaan positiiviseen liikesuuntaan ja ainoat painehäviöt järjestelmässä syntyvät suuntaventtiilissä (putkiston häviöt oletetaan nollassi). Tällöin pumpun tuottaman paineen tulee kattaa sekä sylinterin liikuttamiseen tarvittava paine että venttiilissä tapahtuva painehäviö. Kuorman liikuttamiseen tarvittava paine männänpuoleisessa kammiossa A voidaan laskea kaavan (6) avulla

$$p_L = \frac{(F_L + \Delta p_{vB} \cdot A_B)}{A_A}, \quad (6)$$

jossa F_L on kuorman aiheuttama vastusvoima [N], Δp_{vB} on venttiilissä tapahtuva painehäviö B-kammion puoleisessa virtauksessa [Pa], A_A on sylinterin männän pinta-ala A-kammion puolella [m^2] ja A_B on sylinterin männän pinta-ala B-kammion puolella [m^2]. Kaavassa (6) on sisällytetty suuntaventtiilissä tapahtuva painehäviö B-kammion puoleisessa virtauksessa. Jotta saataisiin selville vaadittu paine järjestelmälle kokonaisuudessaan, pitää kuorman liikuttamiseen tarvittavaan paineeseen lisätä vielä A-kammioon menevälle virtaukselle tapahtuva painehäviö venttiilissä kaavan (7) mukaisesti

$$p_{vaadittu} = \frac{(F_L + \Delta p_{vB} \cdot A_B)}{A_A} + \Delta p_{vA}, \quad (7)$$

jossa Δp_{vA} on venttiilissä tapahtuva painehäviö A-kammion puoleisessa virtauksessa [Pa]. Koska tilavuusvirta voidaan laskea kertomalla keskenään A-kammion puoleinen männän pinta-ala ja sylinterin nopeus, järjestelmään tuotettu teho on lopulta kaavan (8) mukainen

$$P_{tuotto} = \left(\frac{(F_L + \Delta p_{vB} * A_B)}{A_A} + \Delta p_{vA} \right) * v * A_A, \quad (8)$$

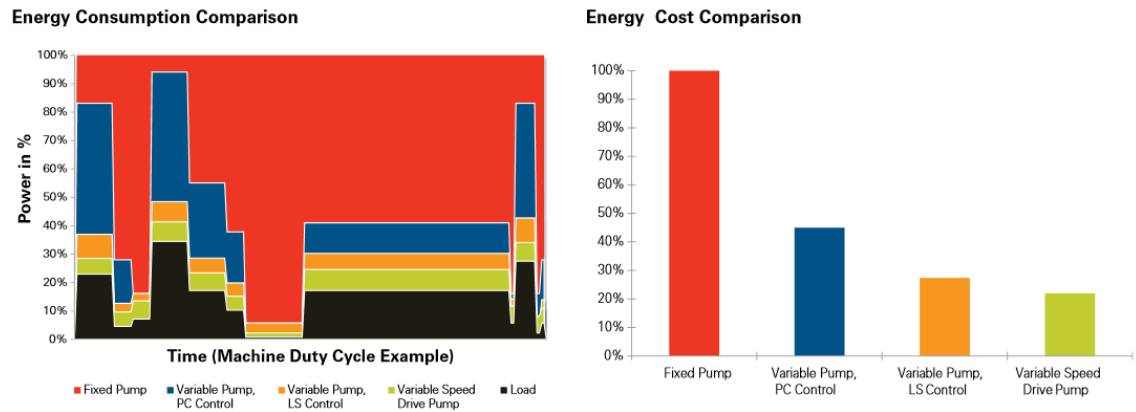
jossa v on sylinterin nopeus [m/s]. Kaava voidaan vielä supistaa kaavan (9) mukaiseksi

$$P_{tuotto} = v * (F_L + \Delta p_{vB} * A_B + \Delta p_{vA} * A_A) \quad (9)$$

Kolmas vaihtoehto venttiiliohjauksen ja avoimen pumppuohjatun järjestelmän lisäksi on suljettu pumppuohjattu järjestelmä [1]. Kuten kuvasta 3 nähdään, se ei välttämättä tarvitse venttiilejä nestevirtauksen ohjaamiseen sylinterille. Kuvan järjestelmä on kuitenkin vain periaatekuva, eikä se suoraan olisi toimiva kokonaisuus, sillä järjestelmän vuotojen kompensoimiseksi tarvittaisiin erillinen apupumppu.

Koska suljetussa järjestelmässä ei välttämättä tarvita kovinkaan paljon erilaisia venttiileitä, lämpöä syntyy vähemmän laitteen ollessa käynnissä, mikä osaltaan pidentää laitteen elinikää ja sen kustannuksia. Avoimeen järjestelmään verrattuna myös öljytilavuudet ovat pienemmät. [1]

Yleisesti ottaen komponenttivalmistajat lupaavat, että pumppuohjatut järjestelmät ovat hiljaisempia ja hyvin energiatehokkaita [7, 10]. Kuvan 4 kuvaajissa on havainnollistettu pumppuohjausjärjestelmien energiatehokkuutta verrattuna vakiotilavuuksiseen pumppuun (syöttää koko ajan samaa tilavuusvirtaa järjestelmään, punainen väri kuvaajissa), painekompensoituun säätötilavuuspumppuun (PC-control, ”Pressure Compensated control”, sininen väri kuvaajissa) ja LS-ohjattuun säätötilavuuspumppuun (Load Sensing, oranssi väri). Paineekompensoidussa pumpussa säätötilavuuspumpun tuotto määräytyy järjestelmän paineesta käytön aikana ja halutusta maksimipaineesta. Pumppu tuottaa täyttä kierrostilavuutta, jos järjestelmän paine on alle halutun maksimiarvon. Kuitenkin paineen lähestyessä maksimiarvoa, painekompensointi pienentää pumpun tuottoa ja lopulta säätää pumpun tuoton nollassa, jos maksimipaine saavutetaan. Kuvan 4 vasemmanpuoleisessa kaaviossa mustalla värillä näkyy toimilaitteella olevan kuorman suuruus esimerkkityökierron aikana, ja muilla väreillä on esitetty, kuinka paljon eri järjestelmät kuluttavat energiaa kyseisenlaisen työkierron aikana suhteessa toisiinsa. Oikeanpuoleisessa pylväsdiagrammissa taas on havainnollistettu säätötilavuuksisten pumppujärjestelmien ja pyörimisnopeussäädetyn pumppuohjausjärjestelmän energiakustannuksia suhteessa vakiotilavuuksiseen pumppuun.



Kuva 4. Pumppuohjauksen energiankulutus verrattuna muunlaisiin järjestelmiin [11, s. 2].

Pienempien öljytilavuuksien vuoksi pumppuohjaukset ovat myös saasteettomampia. Lisäksi ne ovat kompaktin kokoisia ja järjestelmiin voidaan asentaa pienemmän kokoisia pumppuja, jotka kuitenkin kykenevät toteuttamaan halutun lopputuloksen. Järjestelmät tuottavat myös vähemmän lämpöä, jolloin jäähdytykseen sijoitettavat kustannukset pienenevät. [7, 10]

2.3 Hybridiohjaus

Hybridiohjauksella tarkoitetaan venttiiliohjauksen ja pumppuohjauksen yhdistelmää, jonka tarkoituksena on tuoda esille molempien ohjaustapojen vahvat puolet ja eliminoida heikot osa-alueet. Esimerkiksi Markus Flor ja Herman Mehling [12] Bosch Rexrothilla tutkivat pumppuohjauksen ja digitaalihydrauliikan yhdistämistä. Tutkimuksessa sylinteriä ohjattiin sekä pyörimisnopeussäädetyn pumppuohjauksen että 1-bitin digitaalihydrauliikkaventtiilin avulla. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaistettu hydrauliikkakaavio tutkimuksessa olleesta järjestelmästä.

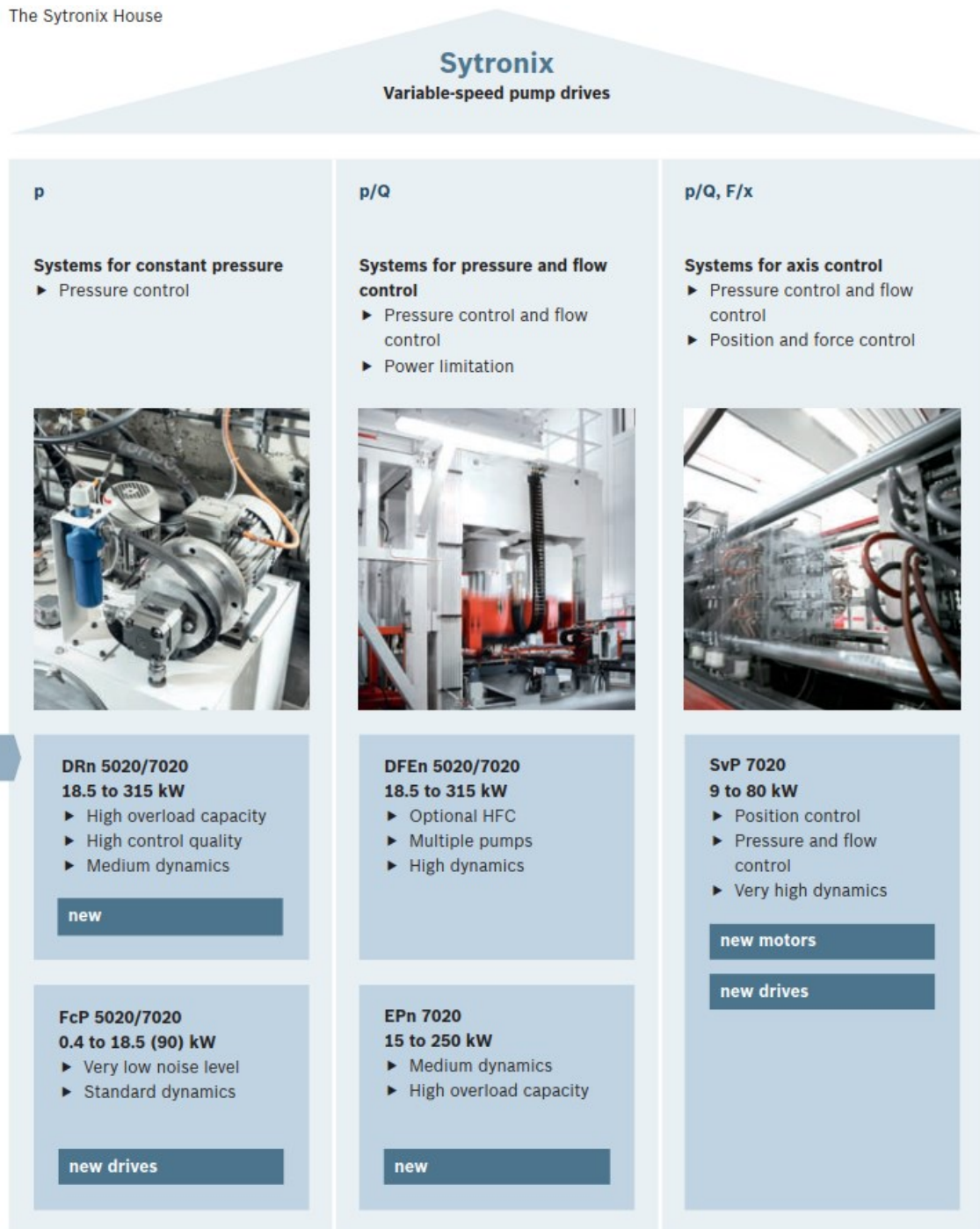
3. KAUPALLISET TUOTTEET

Tässä luvussa tuodaan esille yleisesti saatavilla olevia pyörimisnopeussäädettyjä pumppuohjausyksiköitä. Työhön valikoitui lopulta kolmen eri valmistajan pumppuohjausjärjestelmät, joista käydään läpi hieman niiden teknisiä ominaisuuksia.

3.1 Sytronix

Sytronix on Bosch Rexrothin kehittämä pumppuohjausyksiköiden tuoteperhe, jonka markkinoinnissa energiatehokkuutta pidetään merkittävimpänä ominaisuutena. Rexroth ilmoittaa Sytronixin katalogissa, että energiasäästöt voivat joissakin tapauksissa olla jopa 80 %. Tuotteen luvataan myös olevan hiljaisempi, kompaktisti suunniteltu ja helppo ottaa käyttöön. [9, s. 3–5]

Sytronix-yksikkö sisältää hydraulipumpun, sähkömoottorin, ohjaimen ja säätösovelluksen. Asiakas voi halutessaan itse valita jokaisen komponentin erikseen laajasta valikoi-
masta, mutta tilausta helpottaakseen Bosch Rexroth on jakanut pumppuohjausyksiköt kolmeen ryhmään niiden erilaisten ominaisuuksien mukaan kuvan 6 mukaisesti. [9, s. 6–7 ja 42] Ryhmissä olevista yksikkökokonaisuuksista voidaan muodostaa useita erilaisia variantteja, joten tässä alaluvussa käydään ryhmät läpi vain pääpiirteittäin.



Kuva 6. Sytronix-tuoteperheen jakautuminen kolmeen eri ryhmään [9, s. 7].

Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat pumppuohjauskokonaisuudet, joita käytetään vakio paineisissa hydraulikkajärjestelmissä. Ryhmään sisältyy kaksi mallia: Sytronix FcP ja Sytronix DRn. Molemmat soveltuvat avoimiin hydraulijärjestelmiin. Erona FcP:llä ja DRn:llä on se, että FcP-järjestelmissä pumppu on vakiotilavuuksinen ja DRn-järjestelmissä säätötilavuuksinen. Tämän vuoksi FcP-järjestelmiä ohjataan ainoastaan sähkömoottorin pyörimisnopeutta muuttamalla, kun taas DRn-järjestelmissä myös pumppu ohjaa itsenäisesti järjestelmään tuotettua painetta. Tavallisesti FcP-järjestelmillä tuotetaan tehoa 18,5 kilowattiin asti, mutta asiakkaan halutessa komponentteja voidaan valita siten,

että tuotettu teho voi kasvaa aina 90 kW:iin. Laajemman ohjauksen ansiosta DRn-järjestelmillä tuotettu teho voi olla korkeimmillaan 315 kW. FcP:n vahvuus on todella matala melutaso, ja DRn:n vahvuudet ovat laajempi ohjattavuus ja hyvä dynaaminen suorituskyky. Vakiopainejärjestelmiin soveltuvia pumppuohjausyksiköitä voidaan käyttää esimerkiksi hydraulisissa puristimissa. [9, s. 6 ja 12–27]

Toiseen ryhmään kuuluvat pumppuohjauskokonaisuudet, joilla voidaan paineen lisäksi ohjata myös järjestelmän tilavuusvirtaa. Myös tämä ryhmä sisältää kaksi eri mallia: Sytronix DFEn ja Sytronix EPn. Molemmat sisältävät sekä nopeussäädettävän sähkömoottorin että säätötilavuuksisen pumpun. Erona ensimmäisen ryhmän järjestelmiin on se, että järjestelmän paineen ohjaamisen lisäksi myös hydraulipumpun tuottamaa tilavuusvirtaa voidaan ohjata sähköhydraulisesti. Lisäksi laajemman ohjattavuuden ansiosta tämän ryhmän tuotteilla dynamiikka on korkeampi ja niitä voidaan hyödyntää järjestelmissä, joissa on useampia toimilaitteita. Toisen ryhmän järjestelmistä DFEn kykenee tuottamaan tehoa 315 kW:iin ja EPn 250 kW:iin asti ja ne soveltuvat avoimiin hydraulijärjestelmiin. Niillä on myös kaksi erilaista ohjaustapaa. Jos järjestelmän sisältävän sovelluksen työkierto on aina toistuva, pumppuohjaukselle voidaan tallentaa valmis paine-virtausprofiili, jonka mukaan pumppuohjaus toimii. Jos taas työkierto muuttuu, voidaan järjestelmä asettaa mittaamaan jatkuvasti reaaliajassa järjestelmän vaatimaa painetta ja tilavuusvirtaa, minkä avulla moottoria ja pumppua ohjataan siten, että järjestelmän vaatimat paine- ja tilavuusvirta-arvot toteutuvat ja energiasäästöt ovat mahdollisimman suuret. Näitä pumppuohjauskokonaisuuksia voidaan hyödyntää esimerkiksi muovikappaleiden valmistuksessa käytettävissä laitteissa. [9, s. 6 ja 28–35]

Kolmas ja viimeinen ryhmä sisältää ohjauksen puolesta monipuolisimmat järjestelmät. Tähän ryhmään kuuluu Sytronix SvP -pumppuohjausyksiköt, jotka sisältävät säätötilavuuksisen pumpun lisäksi synkronisen servomoottorin. SvP-pumppuohjausyksiköt ovat ohjattavuudeltaan monipuolisimpia, sillä niillä onnistuu paine- ja tilavuusvirtasäädön lisäksi myös asema- ja voimasäätö järjestelmästä kerätyn paine-, moottorin pyörimisnopeus- ja toimilaitteen asematiedon avulla. Tämä tarjoaa parhaimman dynaamisen suorituskyvyn Sytronix-tuoteperheessä ja korkean tarkkuuden. SvP-järjestelmät soveltuvat sekä avoimiin että suljettuihin hydraulijärjestelmiin ja kykenevät tuottamaan suuria energiasäästöjä. SvP-järjestelmät pystyvät tuottamaan tehoa 80 kW:iin asti, ja ne soveltuvat esimerkiksi metallintyöstölaitteisiin. [9, s. 6 ja 36–41]

Sähkömoottoreita on tarjolla Sytronix-järjestelmiin kolmenlaisia. Näitä ovat standardimallinen epäsynkroninen sähkömoottori IndraDyn E (MOT-FC), servomoottori IndraDyn S (MS2N) ja synkroninen servomoottori IndraDyn S (MSK). Ohjaimia taas löytyy kaksi eri sarjaa. EFC5610 taajuusmuuntaja soveltuu epäsynkroniselle sähkömoottorille, ja IndraDrive-sarjan invertteri ja konvertteri soveltuvat servomoottoreille. [9, s. 50 ja 59]

Asiakkaan valintoja helpottaakseen Bosch Rexroth tarjoaa myös SytronixSize-nimisen ohjelman, joka opastaa mahdollisimman energiatehokkaan Sytronix-yhdistelmän valinnassa. Sovellukseen näppäillään järjestelmän parametreja ja tietoja työkierron kulusta (esimerkiksi painearvot työkierron eri vaiheissa). Tämän jälkeen ohjelma automaattisesti laskee, mikä komponentti on paras juuri kyseiseen järjestelmään. [9, s. 45]

3.2 Eaton VSD

Myös Eaton on kehittänyt oman VSD-pumppuohjausjärjestelmänsä (Variable Speed Drive), jonka markkinoinnissa toistuvat hyvinkin samat asiat kuin Rexrothin Sytronix-tuoteperheellä. Eaton mainostaa, että sen muuttuvanopeuksiset pumppuohjausjärjestelmät voivat leikata energiakustannuksia jopa 70 % sovellusta käyttävän laitteen työkierrosta riippuen. Korkeampi energiatehokkuus vähentää järjestelmässä syntyvää lämpöä, minkä vuoksi jäähdytykseen sijoitettavia kustannuksia voidaan karsia tai ne voidaan jopa eliminoida kokonaan. Järjestelmässä tarvittavan hydrauliöljyn määrä on myös pienempi ja pumppuohjausjärjestelmien luvataan olevan hiljaisempia työskentelyn aikana. [13, s. 4–5]

Eatonin VSD-järjestelmien tuotekatalogissa on esitelty erilaisia komponenttivalintoja, jotka voidaan yhdistää kokonaiseksi pumppuohjausyksiköksi asiakkaan tarpeiden mukaisesti [13, s. 6]. Komponenteista voidaan tehdä Sytronixin tavoin useita erilaisia variaatioita, joten tässäkin tuotteet käydään vain pääpiirteittäin läpi.

Taulukko 1 on poimittu Eatonin tuotekatalogista [13, s. 6]. Siitä nähdään, millaisia komponentteja on saatavilla ja millaisiin teollisuussovelluksiin niitä voidaan käyttää.

Taulukko 1. Eatonin VSD-järjestelmissä käytettävät komponentit ja niiden teknisiä tietoja ja sovellusmahdollisuuksia [13, s. 6].

Pump	Displacement (cc/rev)	Pressure (bar)	Min speed (rpm)	Max speed (rpm)	Hydraulic Closed-loop motion control			Hydraulic Open-loop motion control			
					Plastics	Press	Machine tool	Die casting	Oil/Gas/ Marine	Processing	General industrial
Piston											
425 series	80	210	0	2200	✓						✓
PV/M	18-141	up to 315	0	up to 2800	✓	✓	✓		✓	✓	✓
PF(V)X & PV(I)W	66-750	350	0	up to 1800		✓			✓	✓	✓
Vane											
VMQ	10-240	290	200	up to 3000				✓	✓	✓	✓
V series	7-193	up to 210	200-500								✓
V10 & 20	3-42	up to 170	200-600	up to 3400			✓				✓
IMP											
Integrated motor pump package	Depending on pump choice					✓			✓	✓	✓
Drive											
Standard performance VFD, DG1								✓	✓	✓	✓
High performance VFD, SPX9000						✓	✓				

Note

1. Please consult Eaton application engineering for greater details as needed
2. See speed-pressure performance curve for details

Eatonin pumppuohjausyksiköiden ohjaukseen on kaksi vaihtoehtoa: PowerXL DG1 ja SPX9000-sarja. Erona näillä on se, että DG1 soveltuu avoimiin ohjausjärjestelmiin ja SPX9000 suljettuihin järjestelmiin. Avoimissa järjestelmissä sähkömoottorin pyörimisnopeutta säädetään ilman takaisinkytkentää eli järjestelmästä ei kerätä tietoa, vaan pyörimisnopeus ohjautuu ainoastaan halutun tilavuusvirran mukaisesti. Suljetussa järjestelmässä hydraulijärjestelmän painetta ja sähkömoottorin pyörimisnopeutta mitataan jatkuvasti ja näiden tietojen perusteella ohjain muokkaa komponenttien toimintaa. Sähkömoottoreita on saatavilla erikokoisia, ja maksimitehotuotto niillä voi olla 7,5–92 kW. Hydraulipumppujen määrän ansiosta pumppuohjausyksiköistä voidaan tehdä todella monia erilaisia variantteja. Pumppujen valinta määräytyy sen mukaan, millaiseen sovellukseen se on tarkoitettu ja millaisia painearvoja vaaditaan työkierron aikana. Pumput voivat olla joko vakiotilavuuksisia tai säätötilavuuksisia. Myös joissakin tapauksissa samaan järjestelmään voidaan kytkeä kaksikin pumppua. [13]

3.3 Parker Variable Controlled Pump

Kolmas esille tuotava pyörimisnopeussäädetty pumppuohjausjärjestelmä on Parker Hannifinin kehittämä Variable Controlled Pump. Yksikkö sisältää tässäkin hydraulipumpun, sähkömoottorin ja taajuusmuuntajan. Jo edellä esitettyjen tuotteiden tapaan Parkerin pumppuohjausjärjestelmä voidaan täysin koota asiakkaan toiveiden ja käytetyn sovelluksen vaatimuksien mukaisesti. Parker tarjoaa DriveCreator-nimisen ohjelman, jolla voidaan jo etukäteen selvittää paras mahdollinen yhdistelmä vastaamaan asiakkaan tarpeita. Ohjelmalle syötetään ensin tiedot, miten sylinterin halutaan sovelluksessa liikkuvan joko sen nopeus- ja kuormatietojen tai paine- ja tilavuusvirtatietojen avulla. Tämän jälkeen ohjelma etsii parhaan yhdistelmän vastaamaan työkiertoa ja laskee mahdolliset säästöt verrattuna tavanomaisiin järjestelmiin, jotka toimivat vakionopeudella. [14, 15]

Komponenttien suuren määrän vuoksi myös Parkerin pumppuohjausyksiköistä voidaan muodostaa useita erilaisia variantteja. Sähkömoottoreita on saatavilla tavallisia epäsynkronisia moottoreita, synkronisia servomoottoreita ja kompakteja synkronisia servomoottoreita. Epäsynkronisilla moottoreilla tehoa voidaan tuottaa 1,5 kW:sta 250 kW:iin, ja niiden vahvuudet ovat yksinkertainen rakenne, korkea hyötysuhde ja kevyt paino. Synkronisilla servomoottoreilla voidaan tuottaa tehoa 1,3 kW:sta 87,8 kW:iin, ja niiden vahvuudet ovat nopea kiihtyvyys ja dynamiikka. Viimeisen ryhmän moottoreilla tehontuotto voi olla 11,5–114 kW, ja niiden vahvuudet ovat korkea tehotehitys, hyvä tarkkuus ja hiljainen käyntiääni. [15]

Järjestelmän ohjaimeksi Parker tarjoaa omia AC30V-sarjan ohjaimia, jotka soveltuvat kaikkiin Parkerin moottorityyppeihin. Pumppujen valintaan taas löytyy useampikin vaihtoehto, sillä tarjolla on monia erikokoisia vakiotilavuuksisia siipipumppuja ja säätötilavuuksisia aksiaalimäntäpumppuja. Pumppuja voi valita yksikköä varten joko yksi tai kaksi asiakkaan tarpeiden mukaan. [15]

4. PUMPPUOHJAUSJÄRJESTELMIEN ONGELMIA

Vaikka pyörimisnopeussäädettyjen pumppuohjausjärjestelmien vahvuudet ovat hyvinkin merkittäviä, ne eivät kuitenkaan vielä nykypäivänä ole kovinkaan yleinen vaihtoehto hydraulijärjestelmien toteuttamisessa eri syiden vuoksi. Esimerkiksi hydraulikkaan ja pneumatiikkaan liittyviä uusia tuotteita ja uutisia esittelevän Fluid Power World -lehden verkkosivuilla 19.2.2016 ilmestyneessä julkaisussa [16] käsiteltiin National Fluid Power Associationin (NFPA) vuonna 2015 tekemää tutkimusta, jossa kysyttiin useiden käyttäjien mielipiteitä liittyen pumppuohjausjärjestelmiin. Lisäksi julkaisua varten haastateltiin kolmea asiantuntijaa, jotka olivat kaikki eri yritysten (Eaton, Parker Hannifin ja Siemens) edustajia. Kyselyyn saatiin yhteensä 1788 käyttökelpoista vastausta, joista 46 % tuli henkilöiltä, joilla oli insinööritausta. Vastaajien esille nostamia huonoja puolia olivat järjestelmän korkea hankintahinta, ylläpidon ja jälkimyyntituen puute Variable Speed Drive (VSD) -teknologiaan ja järjestelmän suunnitteluun tarvittavan ammattitaidon puute. Haastateltavana olleen Eatonin edustajan Lyle Meyerin mukaan hankintahinta ei kuitenkaan enää ole suurin este järjestelmän käyttöönotolle, sillä hydrauliset komponentit eivät järjestelmässä muutu ja sähkökomponenttien hinnat ovat laskeneet paljon viime vuosien aikana. Meyerin mukaan syy on lähinnä se, että koneenomistajat ja -käyttäjät, jotka eivät ole aikaisemmin käyttäneet VSD-ratkaisuja, eivät ymmärrä, että suorituskyky ei järjestelmää käytettäessä muutu ja samalla koneet kestävät pidempään ja tuottavat säästöjä.

Yksi huomionarvoinen asia on myös se, että mobilehydraulikkaan (liikkuvien laitteiden hydraulikka) soveltuvia pyörimisnopeussäädettyjä pumppuohjausjärjestelmiä ei juurikaan ole saatavilla tai niitä ei mainosteta kovinkaan näkyvästi. Järjestelmät ovat lähinnä tarkoitettu hydraulisiin teollisuudessa käytettyihin laitteisiin. Tämä johtuu järjestelmien erilaisuudesta. Teollisuussovelluksissa hydraulipumppuja pyöritetään tavallisesti sähkömoottoreilla, joiden tilalle voidaan helposti vaihtaa VSD-järjestelmä. Mobilelaitteissa taas pumppuja pyöritetään useimmin diesel-moottorin avulla. Pyörimisnopeussäädön käyttäminen mobilelaitteessa on hankalampaa, koska sähkömoottorin pyörittämiseen tarvittava sähköenergia pitää ensin tuottaa esimerkiksi generaattorin avulla ja sitten varastoida akkuihin. Tasavirran muuttaminen sähkömoottorin tarvitsemaksi vaihtovirraksi ei teknisesti ole haastavaa, mutta VSD-järjestelmän lisääminen saattaa silti johtaa laitteen täydelliseen uudelleensuunnitteluun. [17]

5. YHTEENVETO

Kandidaatintyön tarkoituksena oli tutkia kaupallisesti saatavilla olevia pyörimisnopeussäädettyjä pumppuohjausjärjestelmiä, jotka soveltuvat hydraulisiin sylinterikäyttöihin. Aihetta pohjustettiin käymällä aluksi toisessa luvussa läpi hieman hydraulisten ohjaustapojen teoriaa tuoden erityisesti esille pumppuohjausjärjestelmien vahvuuksia, joiden vuoksi ne voisivat olla varteenotettava korvaaja perinteisille venttiiliohjauksille. Kolmannessa luvussa oli varsinainen aiheen käsittely, missä tuotiin esille kolmen eri valmistajan saatavilla olevat pumppuohjausjärjestelmät. Lopulta neljännessä luvussa vielä käsiteltiin pumppuohjauksiin liittyviä ongelmia ja syitä, miksi ne eivät vielä ole niin yleisesti käytettyjä hydraulisissa sovelluksissa.

Työtä tehdessä oli helppo huomata, että viime vuosien aikana kiinnostus pyörimisnopeussäädettyjä pumppuohjauksia kohtaan on kasvanut. Aiheeseen liittyen löytyi jo kiitettävästi tietoa ja työssäkin esille tulleet komponenttivalmistajat mainostavat järjestelmiä näkyvästi. Laitevalmistajien kiinnittäessä yhä enemmän huomiota laitteiden energiatehokkuuteen, pumppuohjausjärjestelmiä pidetään varmasti jo tällä hetkellä hyvinkin varteenotettavana vaihtoehtona venttiiliohjaukselle. Kuitenkin suuri vaikuttava tekijä tällä hetkellä pyörimisnopeussäädettyjen pumppuohjausyksiköiden vähäiseen suosioon voi olla se, että kyseisen järjestelmän toimintaperiaate on ihmisille vielä melko vieras. Perinteiset venttiiliohjatut hydraulijärjestelmät säilyttävät suosiotaan lähinnä sen vuoksi, että niiden toiminta on helpompi ymmärtää ja niissä hyödynnetään tutumpia komponentteja. Kuitenkin jatkuvasti mediassa esillä oleva ilmastonmuutos, tiukentuvat energiasäädökset ja tiedon lisääntyminen pumppuohjatuista hydraulijärjestelmistä ohjaavat hyvin todennäköisesti lähitulevaisuudessa ihmisiä yhä enemmän hyödyntämään Variable Speed Drive -järjestelmiä.

LÄHTEET

- [1] Z. Quan, L. Quan, J. Zhang, Review of energy efficient direct pump controlled cylinder electro-hydraulic technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 35, July 2014, pp. 336–346. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): https://www.researchgate.net/profile/Long_Quan2/publication/294880158_Review_of_energy_efficient_direct_pump_controlled_cylinder_electro-hydraulic_technology/data/56c54a2908aeceffa9e5e52c/Review-of-energy-efficient-direct-pump-controlled-cylinder-electro-hydraulic-technology.pdf
- [2] H. Tommila, Pyörimisnopeussäädetty pumppuohjattu sylinterikäyttö, Diplomityö, Tampere University of Technology, 2015, 104 s. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22808/tommila.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] H. Paavilainen, Hydraulikka 1 -luentomoniste, Metropolia, 2009, 83 s. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): <https://wiki.metropolia.fi/download/attachments/12158203/luentomoniste.pdf>
- [4] 4-way directional servo-valve, Datalehti, Bosch Rexroth. Saatavissa (viitattu 28.11.2017): https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/products_13/product_groups_1/industrial_hydraulics_5/pdfs_4/re29564.pdf
- [5] Pumppujen tuoton säätö, Hydraulikka, Metropolia, 2009. Saatavissa (viitattu 29.11.2017): <https://wiki.metropolia.fi/pages/viewpage.action?pageId=12158136>
- [6] Operating principle, Sytronix Variable-speed pump drives, Bosch Rexroth, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.10.2017): <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/industrial-hydraulics/sytronix-variable-speed-pump-drives/operating-principle/operating-principle-1>
- [7] Variable Speed Drive Pump Solutions, Eaton, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Hydraulics/VariableSpeedDrivePumpSolutions/index.htm#/ecm/idcplg?IdcService=GET_FILE&allowInterrupt=1&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Primary&dDocName=PCT_1234098
- [8] Drive Controlled Pump, Energy Saving Solutions, Esittelymateriaali, Parker Hannifin. Saatavissa (viitattu 29.11.2017): <http://www.parker.com/parkerimages/Parker.com/Literature/Hydraulics%20Group%20US/DCP%20Brochure%20HA473113.pdf>

- [9] Sytronix – variable-speed pump drives, Tuotekatalogi, Bosch Rexroth. Saatavissa (viitattu 29.11.2017): http://www.boschrexroth.com/various/utilities/media-directory/index.jsp?publication=NET&language=en-GB&search_query=R999000331
- [10] Benefits, Sytronix Variable-speed pump drives, Bosch Rexroth, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/industrial-hydraulics/sytronix-variable-speed-pump-drives/benefits/benefits-9>
- [11] Eaton's Variable Speed Drive Pump Solutions, Esittelymateriaali, Eaton. Saatavissa (viitattu 29.11.2017): http://www.eaton.com/ecm/idcplg?IdcService=GET_FILE&allowInterrupt=1&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Primary&dDocName=PCT_1234096
- [12] M. Flor, H. Mehling, Generating application benefits by using an intelligent combination of digital hydraulics throttle control and variable-speed displacement unit drives. IFK 9, 9th International Fluid Power Conference, Modern Fluid Power - Challenges, Responsibilities, Markets, Proceedings, Vol. 1, March 24.-26., Aachen, Germany, pp. 490–497.
- [13] Variable Speed Drive Pump Solution, Tuotekatalogi, Eaton. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): http://www.eaton.com/ecm/idcplg?IdcService=GET_FILE&allowInterrupt=1&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Primary&dDocName=PCT_1234098
- [14] Together, we can increase the performance and energy efficiency of your hydraulic drive system, Parker Hannifin, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): <http://mailserver.parker.com/LP=155?elqTrackId=6909d5d184f44c55be17c4593aec792e&elq=0000000000000000000000000000&elqaid=161&elqat=2&elqCampaignId>
- [15] Drive Controlled Pump, Energy-Efficient Hydraulic System Solutions, Tuotekatalogi, Parker Hannifin. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): <http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/HCD%20Catalogues%20HY11-xxxx/HY11-3352%20UK%20DCP.pdf?elqTrackId=3FA5435A6941AD46CF437773479F116E&elqaid=155&elqat=2>
- [16] M. Gannon, Hydraulic efficiency grows with variable speed drives, Fluid Power World, 19.2.2016, Saatavissa (viitattu 7.11.2017): <http://www.fluidpower-world.com/hydraulic-efficiency-grows-with-variable-speed-drives/>

- [17] G. Scheffel, Energy-Efficient Hydraulics: Variable Frequency Drives as Pump Prime Movers, Fluid Power Journal, 28.6.2013, Saatavissa (viitattu 7.11.2017): <http://fluidpowerjournal.com/2013/06/variable-frequency-drives/>